

慢波结构爆炸发射对高功率太赫兹表面波振荡器的影响

赵文娟¹⁾ 陈再高^{2)†} 郭伟杰²⁾

1) (西安交通大学, 法医学院卫生部法医学重点实验室, 西安 710061)

2) (西安交通大学, 电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2015年1月29日收到; 2015年3月13日收到修改稿)

随着真空电子学器件的工作频率达到太赫兹波段, 表面波振荡器的横截面尺寸变小, 慢波结构的加工精度难以得到保证, 同时由于表面波振荡器的电磁场集中在慢波结构表面, 在高电压工作情况下, 太赫兹波段的表面波振荡器慢波结构爆炸发射电子会影响器件的工作特性. 本文分析了高电压工作情况下 0.14 THz 表面波振荡器慢波结构中电场的分布特性, 研究表明, 在慢波结构区域沿着轴线方向上存在电场幅度的包络分布, 在慢波结构中心位置处靠近慢波结构内半径处电场的幅度最大, 最易爆炸发射产生电子, 采用粒子模拟软件 UNIPIC 模拟了慢波结构处爆炸发射的电子对器件工作特性的影响, 同时考虑了电子回流所产生的二次电子倍增效应, 数值模拟结果表明, 慢波结构电子产生会导致器件的输出功率下降, 从数十兆瓦下降到兆瓦量级.

关键词: 太赫兹源, 表面波振荡器, 慢波结构, 爆炸发射

PACS: 07.57.Hm, 45.10.Db, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.64.150702

1 引言

随着高功率微波源器件的发展, 基于真空电子学的高功率微波源能产生吉瓦的输出功率. 随着输出功率的提高, 器件内部的电场幅度不断增强, 导致器件内部击穿, 产生脉冲缩短现象^[1-3]. 相对论返波管作为一种非常具有潜力的高功率微波源, 其脉冲缩短现象得到了广泛的研究, 研究表明器件内部等离子体产生是器件脉冲缩短的主要原因, 由于相对论返波管采用慢波结构作为高频结构, 相对论电子束在慢波结构中激励电磁波, 该工作机理决定了慢波结构内部的电场强度很大, 更容易产生等离子体, 但是由于慢波结构中等离子体的形成过程非常短, 影响等离子体产生的因数较多, 还没有被广泛认同的击穿物理机理. 研究表明, 产生的等离子体密度在 10^{15} cm^{-3} 以上, 并且电子对器件工作特性的影响比带正电粒子的影响要大许多, 采用爆炸发射的模型可对电子在慢波结构表面的产生进

行描述^[4,5].

太赫兹技术在生物工程、医学成像等方面具有非常重要的应用^[6], 而具有一定功率输出的太赫兹源是太赫兹技术应用的基础^[7], 真空电子学太赫兹器件相对于其他类型的太赫兹源具有输出功率高的特点, 其工作原理与低频段真空电子学器件相同, 因此得到了高功率微波领域科研人员的广泛研究. 当真空电子学器件的工作频率达到太赫兹波段时, 器件的结构尺寸更小, 采用现有的加工工艺, 器件表面的光洁度很难保证, 因此高电压工作的太赫兹真空电子学器件更容易产生爆炸发射电子. 西北核技术研究所围绕高电压工作的过模表面波振荡器, 在太赫兹波产生理论、数值模拟和实验方面也开展了大量的研究工作, 在 CKP1000 和 CKP3000 加速器上实验得到了频率为 0.14 THz 的太赫兹波输出, 利用辐射远场功率密度积分法^[8,9], 实测功率分别达到约 2.6 MW^[9] 和 5 MW^[10], 但与数值模拟设计所得到的输出功率水平 46.2 MW 相

† 通信作者. E-mail: chbtmczg@163.com

差较大^[11]. 由于器件采用了与相对论返波管高频结构类似的周期性慢波结构, 且器件工作在表面波模式, 慢波结构内表面电场的幅度非常大, 导致器件更容易爆炸发射电子. 因此, 为了探讨太赫兹器件输出功率的理论值和实验值的差距, 本文对过模表面波振荡器的慢波结构爆炸发射产生电子所带来的影响进行了研究.

2 0.14 THz 高电压表面波振荡器的场分布特性

高电压下工作的表面波振荡器的结构示意图如图 1 所示, 图中 1 为高压二极管的阴极, 2 为高压二极管的阳极, 3 为二极管的阴极发射面所产生的环形电子束, 4 为慢波结构, 5 为器件的输出端口, 外加引导磁场强度为 4.0 T, 二极管工作电压为 312 kV, 产生的电流为 1.67 kA, 产生电子束的内外半径分别为 2.0 mm, 2.5 mm. 慢波结构由 15 个周期

构成, 周期长度为 0.7 mm, 慢波结构内表面的半径为 3.0 mm, 慢波结构开槽的深度和宽度分别为 0.3 mm, 0.4 mm, 器件工作在 TM_{01} 模, 慢波结构的色散曲线如图 2(a) 所示, 从图中可以看出慢波结构工作在 π 模附近, 归一化电场沿着径向的分布如图 2(b) 所示, 从图中可以看出电场在慢波结构内

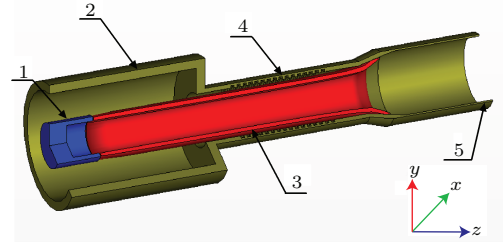


图 1 (网刊彩色) 0.14 太赫兹表面波振荡器的三维示意图 1. 高压二极管阴极; 2. 高压二极管阳极; 3. 阴极发射电子束; 4. 慢波结构; 5. 输出端口

Fig. 1. (color online) 3-D sketch map of 0.14 THz surface wave oscillator. 1. Cathode of high voltage diode; 2. Anode of high voltage diode; 3. Emitted electron beam; 4. Slow wave structure; 5. Output port.

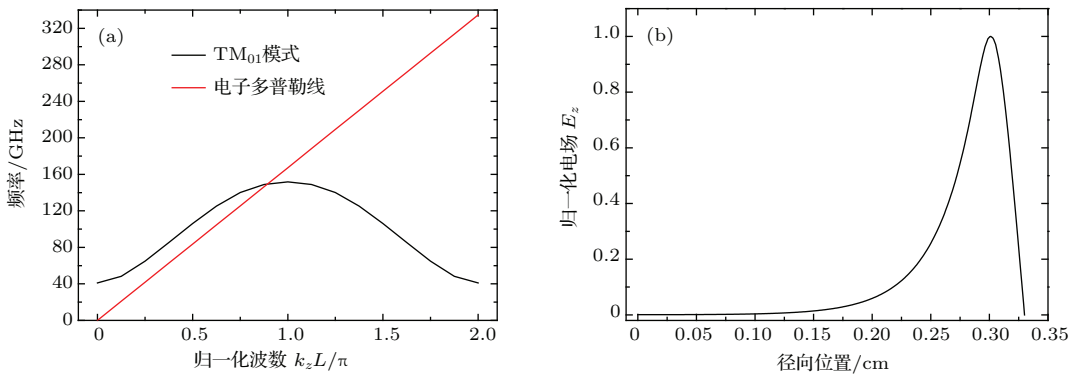


图 2 (网刊彩色) 太赫兹表面波振荡器的冷腔特性 (a) TM_{01} 模色散曲线; (b) 电场沿着轴线的分布

Fig. 2. (color online) Cold-test character of THz surface wave oscillator. (a) Dispersion curve of TM_{01} ; (b) Distribution of E_z along radical direction.

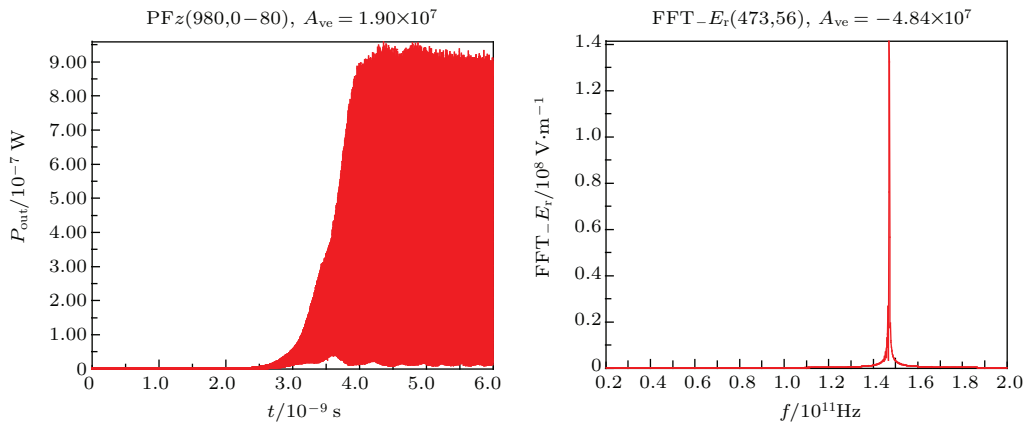


图 3 (网刊彩色) 表面波振荡器的模拟结果 (a) 器件的输出功率; (b) 器件的频谱分布

Fig. 3. (color online) Simulation results of surface wave oscillator. (a) Output power of surface wave oscillator; (b) Spectrum of output signal.

表面处的场强最强, 然后随着径向坐标的变小按指数衰减, 采用 UNIPIC 粒子模拟软件模拟得到器件的输出功率以及工作频谱分布如图 3 所示 [12-14], 其中图 3 (a) 为器件的输出功率随时间的变化, 图 3 (b) 为器件的频谱分布, 从图中可以看出器件的输出功率可以到 46.2 MW, 器件的工作频谱分布比较单一为 0.14709 THz. 图 4 为粒子的相空间图, 从图中可以看出电子束得到了充分的调制, 图 5 为在器件表面径向位置 $r = 0.29$ cm 时电场 E_r 随轴线方向位置的变化, 从图中可以看出慢波结构区域电场的幅值在慢波结构区域为正弦的包络分布, 并且该包络的幅值在慢波结构中心位置附近最强, 该幅值包络的产生有助于器件的起振以及模式选取, 但是也导致了电磁场的能量在慢波结构中心位置处过于集中, 同时由于慢波结构处电场沿着径向为指数衰减分布, 因此在慢波结构中心处靠近慢波结构的表面位置最易产生爆炸发射电子.

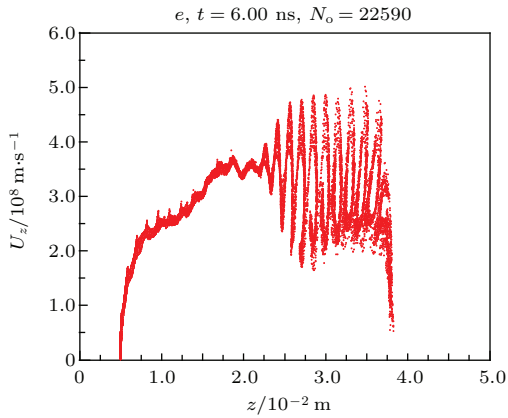


图 4 (网刊彩色) 粒子的相空间图

Fig. 4. (color online) Phase space of electrons.

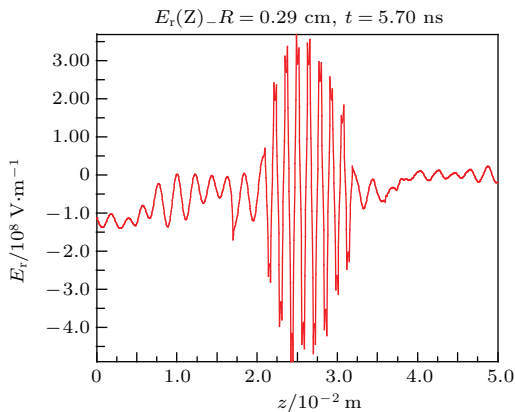


图 5 (网刊彩色) $r = 0.29$ cm 位置处电场沿轴线方向分布

Fig. 5. (color online) Distribution of E_r along axial direction at $r = 0.29$ cm.

3 0.14 THz 表面波振荡器的慢波结构爆炸发射电子模拟研究

基于慢波结构中场分布的特性, 将慢波结构中间的三个周期的边界设置为爆炸发射边界条件, 并且当电子回流打在金属壁时会以一定的概率产生二次电子, 所采用的公式采用 Vaughan 等提出的二次电子产生公式 [15], 并结合 Furman 等给出的关于金属产生二次电子的概率模型 [16,17], 其中二次电子产生公式如以下各式:

$$V_{\max}(\theta) = V_{\max}(0) (1 + k_{sv}\theta^2/2\pi), \quad (1)$$

$$\delta_{\max}(\theta) = \delta_{\max}(0) (1 + k_{s\delta}\theta^2/2\pi), \quad (2)$$

$$v = \frac{V_i - V_0}{V_{\max}(\theta) - V_0}, \quad (3)$$

$$\frac{\delta(\theta)}{\delta_{\max}(\theta)} = (\nu e^{1-v})^k, \quad (4)$$

$$k = k_1 = 0.56, \quad v < 1, \quad (5)$$

$$k = k_1 = 0.25, \quad 1 < v \leq 3.6, \quad (6)$$

$$\frac{\delta(\theta)}{\delta_{\max}(\theta)} = 1.125/v^{0.35}, \quad v > 3.6, \quad (7)$$

其中, 在 (1), (2) 式中, $\delta_{\max}(0)$ 和 $V_{\max}(0)$ 分别为电子的入射方向与界面垂直时, 二次电子最大的产生率以及所对应的入射电压, θ 为电子入射方向与金属表面法线的夹角, $\delta_{\max}(\theta)$ 和 $V_{\max}(\theta)$ 分别为最大二次电子产生率以及所对应的电压随入射角度的变化, k_{sv} 和 $k_{s\delta}$ 对应于平滑因子. (3)–(7) 式中分别为 $\delta(\theta)$ 按照电子入射能量的分段表达形式, v 由 (3) 式依据电子的入射电压 V_i 、金属材料能产生二次电子的最小能量 V_0 以及 $V_{\max}(\theta)$ 确定.

采用上述公式, 在 UNIPIC 软件基础上对器件进行了慢波结构壁爆炸发射电子的模拟 [18,19], 模拟结果如图 6 至图 8 所示, 图 6 为电子的实空间图, 其中图 6 (a) 为整个器件的实空间图, 从图中可以看出从慢波结构中爆炸发射的电子没有进入到从阴极产生的电子束通道, 图 6 (b) 为慢波结构处爆炸发射电子的实空间图, 从图中可以看出, 电子主要被约束在慢波结构表面, 这主要是因为外加引导磁场非常强, 达到 4.0 T, 因此慢波结构处产生的电子无法对正常阴极面产生的束流造成干扰. 图 7 为粒子的相空间图, 从图 7 与图 4 的比较可以看出, 当慢波结构处产生电子时, 电子的调制深度降低, 同时从图 7 可以看出慢波结构发射的电子能量在 5 keV 以内, 能够采用 Vaughan 等提出的二次电子发射模

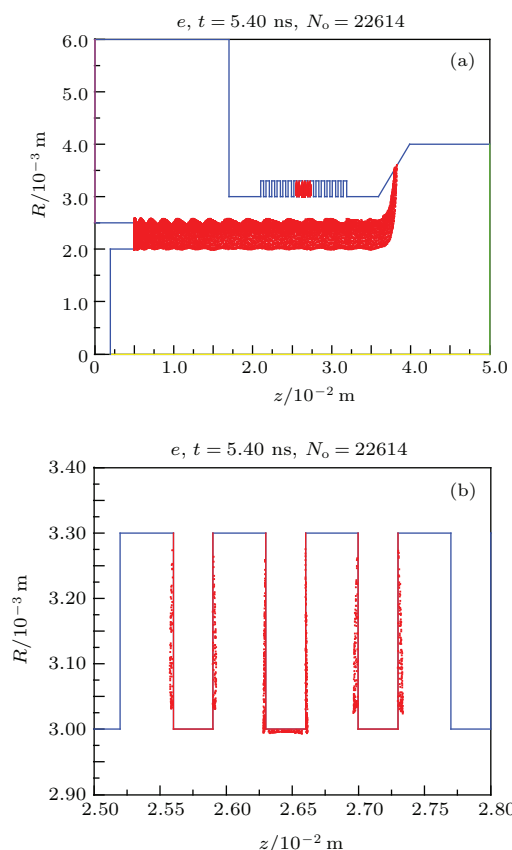


图6 (网刊彩色) 电子的实空间图 (a) 整个器件的实空间图; (b) 慢波结构处电子的实空间图
 Fig. 6. (color online) Real Space of electrons. (a) Real space of electrons in total device; (b) Real space of electron in slow wave structure.

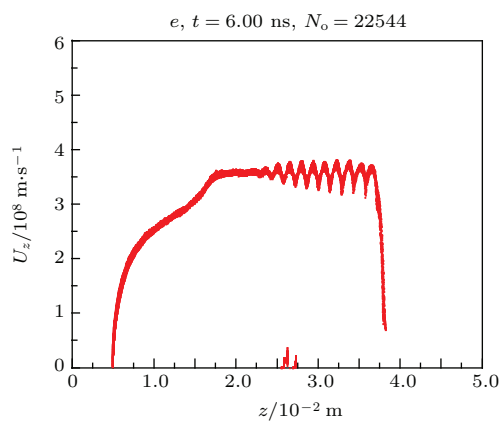


图7 (网刊彩色) 粒子的相空间图

Fig. 7. (color online) Phase space of electrons.

型. 图8(a)为器件的输出功率随时间的变化, 从图中可以看出输出平均功率达到1.89 MW, 下降为原来输出功率的4.1%, 这与实验测量得到的2.6 MW输出功率比较接近. 从图6(b)可以看出慢波结构中产生的电子主要分布在慢波结构壁周围, 并且它的能量一直保持在较低的水平, 因此分析认为不会是因为电子吸收了电磁波的能量而导致输出功率

下降如此多, 依据表面波振荡器的工作原理以及慢波结构处产生电子的能量谱, 慢波结构所在位置电子的产生改变了慢波结构的电磁特性, 影响了前向表面波的传播, 导致在该位置处结构波与电子的相互作用削弱, 电场的幅值降低, 从而使得器件的输出功率下降. 图8(b)为器件的频谱分布, 从图中可以看出器件的工作频率比较单一, 稳定在0.14771 THz, 相比正常工作情况时, 频率略有升高, 这是由于在慢波结构中电子的存在, 导致器件的慢波结构的电尺寸变小, 从而使得器件的工作频率上升.

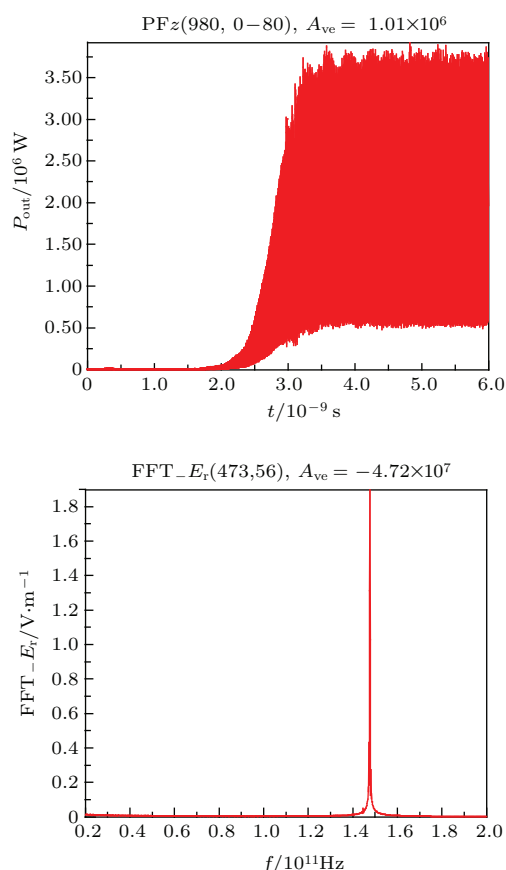


图8 (网刊彩色) 表面波振荡器的模拟结果 (a) 器件的输出功率; (b) 器件的频谱分布
 Fig. 8. (color online) Simulation results of surface wave oscillator. (a) Output power of surface wave oscillator; (b) Spectrum of output signal.

4 结 论

本文分析了表面波振荡器中电场的分布特性, 研究表明电场在慢波结构内沿着轴线方向的中心位置并且靠近慢波结构内表面处电场的幅度最大, 最有可能导致慢波结构爆炸发射而产生电子, 全电磁PIC粒子模拟研究表明, 慢波结构爆炸电子发射会影响器件的功率输出, 导致功率大幅下降, 因此

在器件的后续改进上有多种方法可以用来抑制慢波结构等离子体形成,采用倒角的方式能降低表面电场的强度,借鉴微波器件上涂抹电子发射系数小的材料,提高太赫兹器件的加工工艺,同时研究慢波结构等离子体的形成机理,探索抑制慢波结构爆炸发射电子的新方法.

参考文献

- [1] Benford J, Swegle J 1992 High Power Microwaves (Boston: Artech House) ch. 6
- [2] Insepov Z, Norem J, Vetizer S, Mahalingam S 2011 *AIP Conf. Proc.* **1406**, Newport, USA, June 1-3, 2011 p523
- [3] James Benford, Gregory Benford 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 311
- [4] Hegeler F, Grabowski C, Schamiloglu E 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 275
- [5] Norem J, Insepov Z, Huang D, Mahalingam S, Veitzer S 2010 *AIP Conf. Proc.* **1222** Chicago, USA, July 20-25, 2009 p348
- [6] Dong C, Bao R M, Zhao K, Xu C H, Jin W J, Zhong S X 2014 *Chin. Phys. B* **23** 127802
- [7] Booske J H 2008 *Phys. Plasmas* **15** 055502
- [8] Wang G Q, Wang J G, Li X Z, Fan R Y, Wang X Z, Wang X F, Tong C J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8459 (in Chinese) [王光强, 王建国, 李小泽, 范如玉, 王行舟, 王雪峰, 童长江 2010 物理学报 **59** 8459]
- [9] Wang G Q, Wang J G, Tong C J, Li X Z, Li S, Wang X F, Lu X C 2013 *Phys. Plasmas* **20** 043105
- [10] Li X Z, Wang J G, Sun J, Song Z M, Ye H, Zhang Y C, Zhang L J, Zhang L G 2013 *IEEE Trans. Electron Dev.* **60** 2931
- [11] Li X Z, Wang J G, Song Z M, Chen C H, Sun J, Zhang X W, Zhang Y C 2012 *Phys. Plasmas* **19** 083111
- [12] Wang J G, Wang Y, Zhang D H 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 681
- [13] Wang J G, Zhang D H, Liu C L, Li Y D, Wang Y, Wang H G, Qiao H L, Li X Z 2009 *Phys. Plasmas* **16** 033108
- [14] Wang J G, Chen Z G, Wang Y, Zhang D H, Liu C L, Li Y D, Wang H G, Qiao H L, Fu M Y, Yuan Y 2010 *Phys. Plasmas* **17** 073107
- [15] Rodney J, Vaughan M 1993 *IEEE Trans. Electron Dev.* **40** 830
- [16] Rodney J, Vaughan M 1989 *IEEE Trans. Electron Dev.* **36** 1963
- [17] Furman M A, Pivi M T F 2003 SLAC-PUB-9912
- [18] Cai L B, Wang J G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3268 (in Chinese) [蔡利兵, 王建国 2009 物理学报 **58** 3268]
- [19] Wang J G, Cai L B, Zhu X Q, Wang Y, Xuan C 2010 *Phys. Plasmas* **17** 063503

Influence of slow wave structure explosive emission on high-power surface wave oscillator

Zhao Wen-Juan¹⁾ Chen Zai-Gao^{2)†} Guo Wei-Jie²⁾

1) (*College of Medicine and Forensics, Key Laboratory of Forensic Sciences, Ministry of Health, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China*)

2) (*School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 29 January 2015; revised manuscript received 13 March 2015)

Abstract

As the working frequency of a vacuum electron device reaches the terahertz frequency band, the cross section of the surface wave oscillators (SWO) becomes very small, and the micro-fabrication precision of the device cannot be guaranteed, at the same time, because the electromagnetic field of SWO concentrates on the inner surface in slow wave structure, when the working voltage of surface wave oscillator is very high, the explosive emission probability of the slow wave structure increases greatly, and the explosive emission can influence the working characteristic of the device. This paper analyses the distributing property of the electrical field in the slow wave structure of 0.14 THz SWO. Parameters of the SWO under study are as follows: working voltage is 312 kV, explosive emitted current is 1.67 kA, periodic length of the slow wave structure is 0.7 mm, width of the slot is 0.4 mm, and the height of it is 0.3 mm; cold-test results indicate that the amplitude of the electrical field in the slow wave structure varies sinusoidally; the amplitude of the electrical field reaches a maximum value in the middle of the slow wave structure near its inner surface, and the explosive electron emission can occur most possibly in this position, because the electrical field in the slow wave structure varies with very high working frequency. The explosive emitted electron may bombard back the slow wave structure, and the secondary electrons will be emitted at a certain probability, for which the formula proposed by Vaughan is used to compute the secondary emission yield, and this formula is implemented in the self-developed particle-in-cell code UNIPIC; while the code is used to simulate 0.14 THz SWO with explosive emission in the slow wave structure. In the simulation, the slow wave structure multipactor discharge induced by electrons is also considered; the phase space of the electrons emitted from the slow wave structure shows that the energy of secondary electrons is below 5 keV, so the validity for secondary electron yield is affirmed. Numerical simulation results indicate that because the emitted electrons from the slow wave structure change the distribution character of the electrical field in the slow wave structure, especially the amplitude of the electrical field in the middle of the slow wave structure, the beam-wave interaction is weakened, and as a result, output power decreases from about 22.6 megawatts to only 1.89 megawatts.

Keywords: terahertz source, surface wave oscillator, slow wave structure, explosive mission

PACS: 07.57.Hm, 45.10.Db, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.64.150702

† Corresponding author. E-mail: chbtmczg@163.com